

PN 符号の循環検出による遠距離コマンド方式

安 田 靖 彦 ・ 村 田 悠 紀 夫

宇宙飛行体へ地上から指令を送るコマンドは、伝送距離が大きいうえに誤りが小さくなければならないので、通信方式にくふうを要する。本文は筆者らが提案する方式の概要をのべたものである。

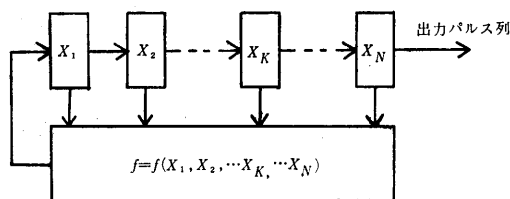
1. はじめに

人工衛星、月ロケットおよび惑星間探測器等の宇宙飛行体へ搭載された各種の機器を地上からの電波指令によって制御することをコマンドと称する。コマンド装置は誤動作をした場合、搭載機器全体に決定的影響を与えることがあるので、非常に高い信頼性を要求されると同時に、雑音による符号誤りが小さくしなければならない。

一般に信号の無線伝送においては、情報伝送速度、送信電力、送受信アンテナ利得、受信機雑音指数等のパラメータに加えて通信方式あるいは符号化方式によって伝送可能な送受信間の距離が定まる。本文では他のパラメータが与えられたとき適切な符号化によって到達距離をできるだけ大きくできるような、言い換えれば一定の到達距離のときできるだけ誤りの小さな（情報伝送速度の大きい）コマンド方式の一案を示し、その実現可能性を実験セットを組立てて検討した結果を述べたものである。

2. PN 符号

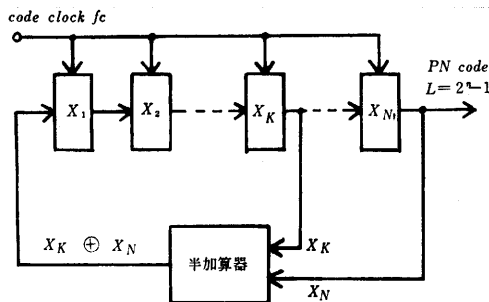
われわれのコマンド方式は符号化に PN 符号を用いる。PN 符号とは pseudo noise code の略であって、2 レベルで作られる符号群の中で最も雑音に近い符号である。この符号の長さ (L) は任意にとれるわけではなく、現在のところ $L=2^n-1$ ($n=1, 2, \dots$) の M 系列およびその他の L を多少満たす Legendre 系列あるいは Hall 系列等が知られている¹⁾²⁾³⁾。今この中で最も一般的な M 系列の作り方を示せば次のとおりである。すなわち図・1



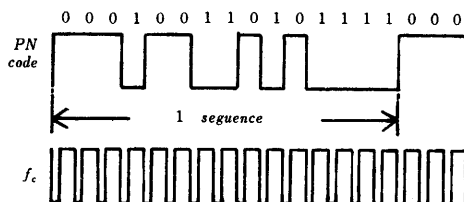
図・1

に示すような N 段のシフトレジスタの各段の出力をブール関数 $f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ によって結合して入力にフィードバックした回路を考える。各段の取りうる状態は“0”または“1”であるから、全体を一つのブラックボックスとみたときの内部状態の数は最大 2^N 個ありうる。したがってシフトパルスによって状態を移していくと、少な

くとも 2^N 個のシフトの後までには同一の内部状態が現われるわけであり、出力パルスの周期は 2^N 個以下となる。ここでフィードバックブール関数を各段出力 X_1, \dots, X_N のパリティ・チェック関数に限定したものを線形シフトレジスタと呼ぶが、これから得られるシーケンスの最大周期 L は $L=2^n-1$ となる。この最大周期をもつシーケンスを最大周期線形シフトレジスタシーケンスまたは M 系列と呼ぶ。たとえば $n=4, L=15$ の M 系列は $f=X_3 \oplus X_4 = X_3 \bar{X}_4 + \bar{X}_3 X_4$ なるフィードバック関数を用いて図・2の回路で作ることができ出力には図・3



図・2



図・3

に示すような系列が得られる。この系列の任意の相続く L ビット (15 ビット) を区切って一つの符号と考えると全部で L 個の符号が得られ、各符号は互いに他の cyclic シフトに等しい。このような符号群を PN 符号と称する。

この PN 符号は次の性質をもっている。

- (i) 平衡性
- (ii) 連なり性
- (iii) 相関性

すなわち (i) は各符号を構成する“0”の数と“1”の数が一定であってほぼ等しいことを意味し、(ii) は“0”または“1”が連続して k 個現われる確率が $1/2^k$ に等しいことを意味し、また (iii) の性質は、PN シーケンスの自己相関関数が以下に述べる性質をもっていること

をいう。

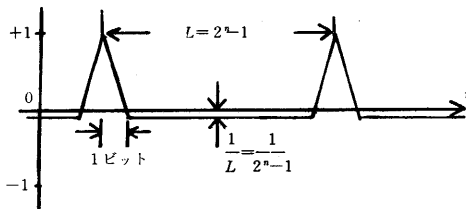
長さ L の PN 符号の自己相関関数は

$$R(\tau) = \frac{1}{L} A_{ve} \{ \text{PN} \oplus \text{PN}(\tau) \} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $A_{ve} \{ \}$ は $\text{PN} \oplus \text{PN}(\tau)$ の“0”の個数から“1”の個数を引いた数を表わす。PN 符号はそれ自身の cyclic シフトと一致するデジットと不一致のデジットの数の差は常に 1 であるから、

$$R(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau=0 \\ -\frac{1}{L} & \tau=1, 2, \dots, 2^n-2 \end{cases} \quad (2)$$

となり、図・4 に示すような特性を持つ。



図・4

また符号 A_i, A_j の間の距離を各ビットごとの比較における不一致の(“1”)の数として定義すれば、PN 符号の場合次の関係が成立する。

$$d(A_i, A_j) = \begin{cases} 0 & i=j \\ 2^{n-1} & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $i, j=1, 2, \dots, L=2^n-1$ 。これは各符号の間の距離が一定であることを示している。一般に長さ L の 2 レベルの符号群の中で各符号間距離を一定としたときその距離の最大値は $(L+1)/2$ を越えないことが証明されている。したがって PN 符号は最もよい符号である。

3. PN 符号と 3 out of 6 符号の比較

われわれが具体的対象としているミュー衛星においては、コマンド項目の要求は十数項目であるから $L=15$ の PN 符号を採用した。今この程度の項目数の他符号として、テルスター衛星において用いられた 3 out of 6 符号の 3 回送りと誤り率を比較してみる。

(i) PN 符号

15 ビットの PN 符号のすべては表・1 に示すとおりである。受信側のパターン検出器のスレッシュホールドレベルを 15 個中の r 個のところにおくとする。すなわち受信された PN 符号の 15 ビット中、 r ビット以下の誤りであるならば、その符号と判定する。符号間の距離 $d(A_i, A_j)=8$ であるから、受信された符号が同時に二つ以上の異なった符号のスレッシュホールドレベルを越えて一義的判定が下せなくなるおそれを除くために、

$$r < \frac{d}{2} = 4 \quad (4)$$

を満足していなければならない。

表・1 15ビット PN code のすべて

コマンド項目	コマンド符号
0	0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1
1	1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1
2	1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1
3	1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1
4	1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0
5	0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1
6	1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0
7	0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1
8	1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1
9	1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0
10	0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0
11	0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1
12	1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0
13	0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0
14	0 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0

今ある符号が送信されたとき、受信側でその符号として受けとることができない確率を P_a とすれば

$$P_a = 1 - \sum_{K=0}^r \binom{15}{K} P_e^K (1-P_e)^{15-K} \\ = \sum_{K=r+1}^{15} \binom{15}{K} P_e^K (1-P_e)^{15-K} \quad (5)$$

ただし、 P_e は各ビットの誤り率。

次に、送信された特定の符号が、他の符号に誤って復号される確率 P_{er} は

$$P_{er} = 14 \sum_{K=0}^r \sum_{\lambda=0}^K \binom{7}{\lambda} \binom{8}{8+\lambda-K} P_e^{8+2\lambda-K} (1-P_e)^{7-2\lambda+K} \quad (6)$$

で与えられる。したがって全然符号として受け付けられない確率 P_m は

$$P_m = P_a - P_{er} \quad (7)$$

となる。

(ii) 3 out of 6 符号

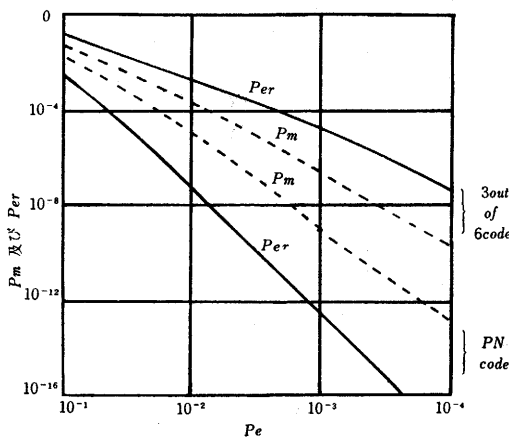
この方式では同一符号を 3 回続けて送り、パリティのとれる最初の符号を復号する。ある符号を受けとったとき、パリティのとれない確率を P_{m1} 、誤った符号に復号される P_{er1} 、正しい符号として受けとれる確率を P_{c1} とする。3 回の送出の結果として最終的に定まる前記の確率をそれぞれ、 P_m, P_{er}, P_c とすれば、

$$p_{c1} = (1-P_e)^6 \\ p_{er1} = 9P_e^2(1-P_e)^4 + 9P_e^4(1-P_e)^2 + P_e^6 \\ p_{m1} = 1 - p_{c1} - p_{er1} \\ p_c = p_{c1} + p_{m1}P_{c1} + P_{m1}^2P_{c1} \\ P_m = P_m^3 \quad (8)$$

$$P_{er} = P_{er1} + P_{m1}P_{er1} + P_{m1}^2P_{er1} \quad (9)$$

となる。

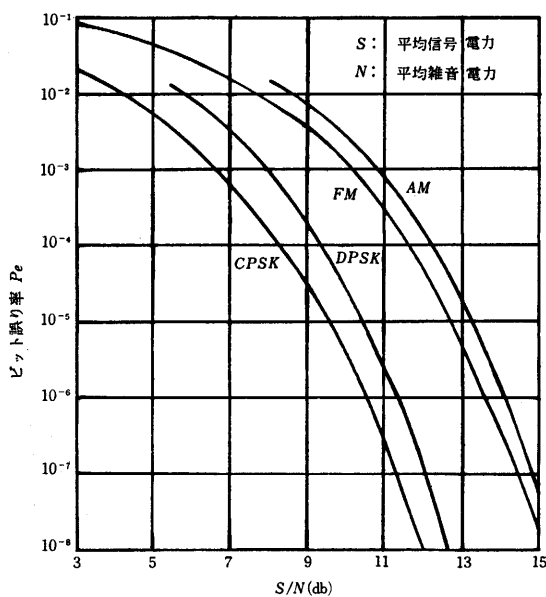
(i), (ii) の場合においてビット誤り率 P_e と P_m, P_{er} の関係を図にしたのが図・5 である。



図・5

4. 副搬送波変調方式

実際にコマンド符号を無線伝送路を通じて伝送する場合、搬送波の変調方式が問題になる。搬送波の変調方式には、振幅変調 (AM)、周波数変調 (FM)、ディフレンシャル位相シフト変調 (DPSK) およびコーヒレント位相シフト変調等があるが、図・6 に示すように入力の



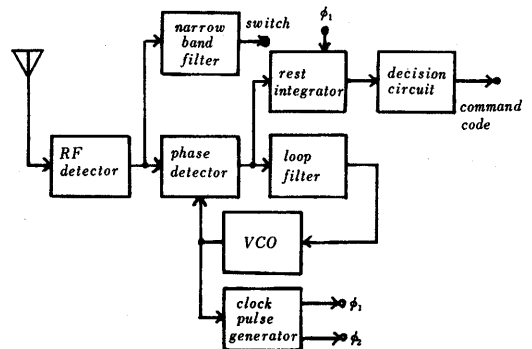
図・6

SNR とビット誤り率は CPSK 方式が最もすぐれている⁴⁾。コマンドでは符号送信期間が短いので、位相同期発振器によってあらかじめ送られてきた基準搬送波を保持するのが容易であるから、誤り率の最も小さい CPSK 方式を採用するのが妥当である。

5. コマンド受信機の構成

送信側ではコマンドを送る際、まず無変調の副搬送波 (基準搬送波) で主搬送波を変調して送信し、受信側の

位相同期発振器を同期してから、PN 符号で CPSK した副搬送波を主搬送波に乗せて送る。これを図・7 に示すブロック図からなる受信機で復調する。すなわち無変調

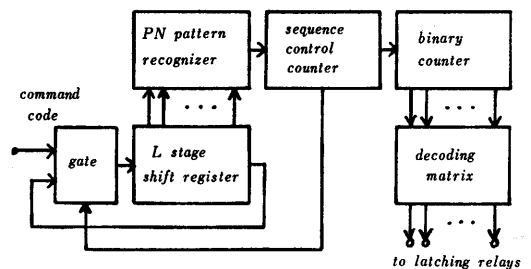


図・7

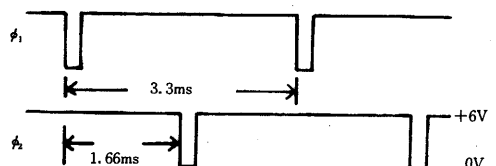
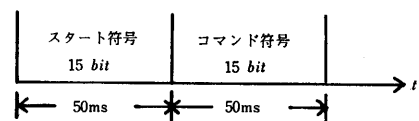
の副搬送波を受信したことを狭帯域のフィルタによって検出し、デコーダ部の電源を投入する。これはデコーダ部の電源を常時はオフしておき、コマンドを行なうときのみオンにすることにより電力消費の節減をはかるためである。また同時に位相同期発振器が副搬送波に同期し、クロックパルスを作る。続いてCPSKされた副搬送波が到来すると、位相同期発振器の出力を用いて、リセット型積分器および判定回路によって、各ビットを検出しデコーダに送る。

6. デコーダの構成

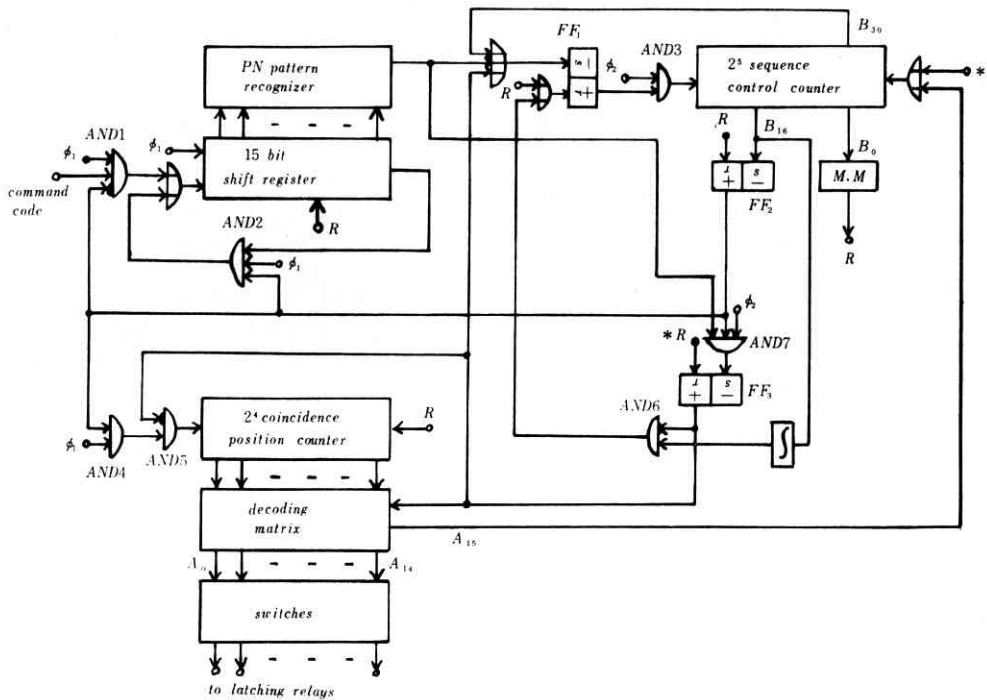
実際のコマンド符号は図・8 に示すようにコマンド項目に相当する PN 符号に先行して項目 0 に対応する PN



図・8



図・9



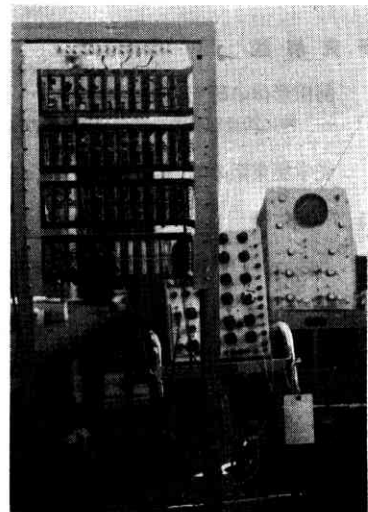
図・10

符号をスタート符号として送信する。したがって一つのコマンド符号は 30 ビットからなる。符号の全時間を 0.1 sec として、1 ビットのタイムスロットは 3.3 ms と定めた。

デコーダのブロック図は図・9 に示すとおりで、まずスタート符号が L (15) 段のシフトレジスタに入り、これが PN パターン検出器により正しいパターンであると判定されると次のシーケンスコントロールカウンタを起動して L ビットを数えてからゲートを閉じる。これによりシフトレジスタにはコマンド項目に相当する L ビットの PN 符号が入る。続いてシフトレジスタをリングカウンタに切り換えて 1 ビットずつ cyclic にシフトしていく。パターンの誤りビット数があらかじめ定めたスレッシュホールド値 r より小さければ、シフトを続けていくうちにパターン検出器においたパターンとシフトレジスタのパターンとが一致し出力を生ずる。この間に要したシフトパルスの個数は送られたコマンド項目に相当し、したがってこれを 2 進計数器でカウントした後、デコーディングマトリックスを通して所定のラッチングリレーを駆動させればよい。

このように cyclic な検出を用いることにより、単一のパターン検出器によって L 項目の符号を識別することが可能になり、回路構成が著しく簡単になると同時に消費電力節減の利点を生ずる⁵⁾。

デコーダ部はこの方式の骨子を成すので、実際に実験セットを組み立ててテストした。図・10 はそのブロック図、図・11 はその全容また図・12 および図・13 は



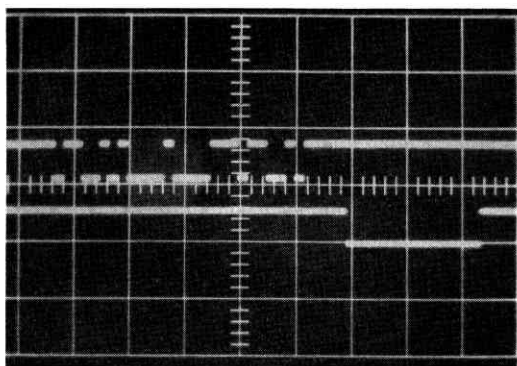
図・11 コマンドデコーダ概観

装置内の波形を示している、この結果方式の実現可能性が確かめられた。

7. 結言および謝辞

本文では 2 レベルのシンボルからなる符号群のうち最も雑音に近い性質をもった PN 符号を用いて、伝送誤りを小さくしたコマンド方式を構成する方法を述べ、さらにパターンの循環検出によってデコーダ部を単純化する手法を明らかにした。

最後にご指導いただいた野村教授また有益な討論をいただいた高木助教授に厚くお礼申し上げる。



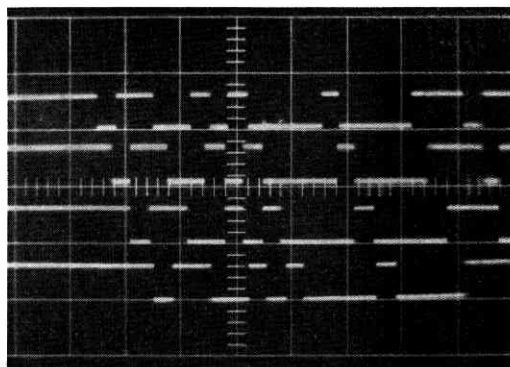
縦軸 10 volt/div 横軸 sec/div

図・12 コマンド符号(上)とスイッチ出力(下)

(1966 年 10 月 7 日受理)

文 献

- 1) S. W. Golomb "Digital Communication" Prentice Hall.
- 2) A. V. Balakrishnan "Advances in Communication Systems"
- 3) J. C. Springett "Command Techniques for the



図・13 シフトレジスタ各部出力

Remote Control of Interplanetary Spacecraft"
Proceedings of 1962 National Telemetering Conference 8-4.

- 4) W. R. Bennett ほか, "Data Transmission" McGraw-hill.
- 5) 安田ほか, "宇宙飛翔体用超遠距離コマンドの一方式" 昭和 40 年通信学会全国大会.

次 号 予 告

(1967 年 1 月号)

研 究 解 説

河床形体の研究の過程について.....井 口 昌 平
——特に20世紀初頭までの研究について——吉 野 文 雄

光学集束系の等価回路表現.....藤 井 陽 一

海 外 事 情

ヨーロッパの道路と道路交通事情.....星 埜 和

研 究 速 報

ホログラムを用いた共役波面干渉法.....小 瀬 輝 次
松 本 和 也アナログ、デジタル方式によるハイブリッドタイマ.....山 口 楠 雄
鈴 木 俊 光触媒の物理的構造による反応選択性.....河 添 邦 太
吉 田 澄 朗 夫

——モレキュラーシーブによるブタノールの脱水反応——

軽量骨材コンクリートの高圧蒸気養生.....小 林 一 輔
伊 藤 利 治

——圧縮強度におよぼす養生条件の影響——

(p. 9 よりつづく)

く、直線性が厳しく要求され、かつ、帯域を要する場合あるいは任意の遅延特性を得たいときには長手方向にテーパをつけて厚みを変化させた板を用いることによって実現できる。

(1966 年 10 月 17 日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐藤: Bull. Earthquake Res. Inst. 29 (1951).

- 2) 井元: 電試集報, 17, 1 (1953).
- 3) 尾上: 超音波専門委員会資料 (1955. 7).
- 4) A. H. Meitzler: IRE Trans IRE UE-7, 35 (1960).
- 5) 屋上, 山田: 非破壊検査, 13, 6, 308 (1964).
- 6) 尾上, 山田: 非破壊検査, 13, 5, 255 (1964).
- 7) A. H. Fitch: JASA, 35, 5, 709 (1963).